

Evaluación del proceso de producción de sirope de fructo-oligosacáridos en una planta de sorbitol

Evaluation of the production process of fructo-oligosaccharide syrup in a sorbitol plant

Héctor Manuel Mengana-Domínguez¹ <https://orcid.org/0009-0004-1891-6698>

Lourdes Zumalacárregui-de Cárdenas^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-6921-737X>

Osney Pérez-Ones¹ <https://orcid.org/0000-0002-0366-0317>

Alejandro Fonte-Pérez² <https://orcid.org/0009-0002-2907-6327>

Guillermo A. González-Pedroso² <https://orcid.org/0000-0002-7154-2304>

¹Grupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), La Habana, Cuba

²Departamento de Tecnología Azucarera, Dirección de Tecnología y Energía, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca), La Habana, Cuba

*Autor para correspondencia. Correo electrónico: lourdes@quimica.cuaje.edu.cu

RESUMEN

Se evaluó la posibilidad de incorporar la producción de fructo-oligosacáridos a partir de sacarosa en la Unidad Empresarial de Base (UEB) “Ignacio Agramonte” que produce actualmente sorbitol, con un bajo aprovechamiento de la capacidad instalada por falta de glucosa, existiendo oportunidad en infraestructura, tiempo y mano de obra para convertir la entidad en una planta multipropósito. Se desarrolló un modelo de simulación de la tecnología de producción de sirope de fructo-oligosacáridos a partir de sacarosa, basada en la transformación enzimática de la sacarosa en fructo-oligosacáridos, utilizando la enzima recombinante 1-SST (1-sacarosa: sacarosa fructo-siltransferasa) expresada en *Pichia pastoris*, obtenida en el Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Sancti Spíritus. La validación del modelo arrojó errores relativos menores que el 5 %. Se evaluaron dos alternativas de mejoras a partir

de aumentar la producción de FOS al utilizar la capacidad real instalada en la fábrica de sorbitol (alternativa 1) y además aumentar la concentración inicial de la solución de sacarosa (alternativa 2). Se evaluó la factibilidad de las alternativas al comparar la ganancia anual después de impuestos (Anci) y los egresos. La alternativa 2 resultó la mejor, produciéndose con ella 841,5 t de fructo-oligosacáridos en 90 días de trabajo, con una relación beneficio / costo de 1,2.

Palabras clave: fructo-oligosacáridos; sorbitol; simulación.

ABSTRACT

The possible production of fructo-oligosaccharides from sucrose was evaluated in the Base Business Unit (UEB) "Ignacio Agramonte", which currently produces sorbitol, with low exploitation of the installed capacity, due to lack of glucose. There was an opportunity in infrastructure, time and labor to convert the entity into a multipurpose plant. A simulation model of the technology for the production of fructo-oligosaccharide syrup from sucrose was developed, based on the enzymatic transformation of sucrose into fructo-oligosaccharides, using the recombinant enzyme 1-SST (1-sucrose: sucrose fructosyltransferase) expressed in *Pichia pastoris*, obtained at the Center for Genetic Engineering and Biotechnology at Sancti Spíritus. Model validation yielded relative errors lesser than 5 %. Two improvement alternatives were evaluated based on increasing the production of FOS by using the actual installed capacity in the sorbitol factory (alternative 1) and also increasing the initial concentration of the sucrose solution (alternative 2). Feasibility of the alternatives was evaluated by comparing the annual net cash income (Anci) and expenses. Alternative 2 was the best, producing 841.5 t of fructo-oligosaccharides in 90 working days, with a benefit/cost ratio of 1,2.

Keywords: fructo-oligosaccharides; sorbitol; simulación.

Recibido: 15/01/2024

Aceptado: 10/04/2024

Introducción

La caña de azúcar es una planta de características excepcionales, capaz de sintetizar carbohidratos solubles y material fibroso a un ritmo superior al de otros cultivos comerciales.⁽¹⁾ A partir de la sacarosa se pueden producir fructo-oligosacáridos (FOS), carbohidratos de cadena corta obtenidos por la degradación de inulina o por acción enzimática. El producto posee muchas aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y agrícola^(2,3) y altos indicadores económicos, tanto de producción como de consumo a nivel mundial. El mercado de FOS a partir de la sacarosa se evaluó en 2,59 billones de USD en 2022, con un crecimiento anual de 8,8 % del 2023 al 2030. La forma líquida (sirope) predomina en el mercado.⁽⁴⁾

Existen antecedentes de investigaciones relacionadas con la obtención de FOS en Cuba.⁽⁵⁾ En el año 2012, en el Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Santi Spíritus se desarrolló una tecnología basada en una enzima libre recombinante expresada en *Pichia pastoris* que logró sintetizar 1-kestosa a concentraciones superiores al 45 %, logrando más de un 55 % en FOS totales. Posteriormente se han realizado estudios del comportamiento de la reacción de síntesis de los fructo-oligosacáridos, a partir de azúcar crudo y licor decolorado, bajo los mismos parámetros de operación ya definidos para la tecnología a partir de azúcar refino y se demuestra que se puede producir FOS con los mismos rendimientos (55 %) y similares niveles de 1-kestosa, debiendo profundizarse en los estudios de remoción de color, fundamentalmente.⁽⁶⁾

Por otra parte, en la Unidad Empresarial de Base (UEB) “Ignacio Agramonte” se produce sorbitol por hidrogenación catalítica utilizando glucosa como materia prima pero, debido a la poca disponibilidad de glucosa, opera aproximadamente 90 días, quedando sin producir el resto del tiempo. Esto crea una oportunidad en infraestructura, tiempo y mano de obra para convertir la entidad en una planta multipropósito.

En este trabajo se evaluó la propuesta de incorporación de una línea de producción de FOS en la Unidad Empresarial de Base (UEB) “Ignacio Agramonte”, aprovechando las capacidades instaladas en la planta, así como los recursos humanos y materiales de los que se dispone. Se utilizó el simulador de procesos SuperPro Designer v10, como herramienta para

facilitar el análisis de procesos para la evaluación de parámetros y la toma de decisiones.

Materiales y métodos

Tecnología de obtención de FOS a partir de sacarosa

La tecnología de elaboración del sirope de FOS utilizadas en el trabajo se basa en la transformación enzimática de la sacarosa en fructo-oligosacáridos (FOS), utilizando la enzima recombinante 1-SST (1-sacarosa: sacarosa fructo-siltransferasa) expresada en *Pichia pastoris*, obtenida en el Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología de Sancti Spíritus.⁽⁷⁾ Los catalizadores enzimáticos 1-SST constituyen alternativas atractivas para la conversión del azúcar de caña en FOS de cadenas cortas del tipo inulina. Con este proceso se obtienen FOS de cadena corta, en particular 1-kestosa y nistosa en proporción 9:1, cuya suma representa de 55 % a 60 % (p/p) del contenido de carbohidratos.⁽⁶⁾

El proceso declarado en (5) consta de seis etapas.

En la primera etapa la sacarosa se disuelve en agua desmineralizada para obtener una solución azucarada de concentración 50 % de sólidos solubles. El proceso se realiza a una temperatura de (75-85) °C mediante la aplicación de vapor saturado a 300 kPa. Al alcanzar 50 °Brix, de ser necesario se ajusta el pH a 5,5±0,1. En dependencia del pH de la disolución se emplea ácido fosfórico o hidróxido de sodio para ajustarlo.

En la segunda etapa, para eliminar las impurezas y suciedad que puedan afectar etapas posteriores, como son el bagacillo, la tierra, así como elementos metálicos (insolubles), se realiza una filtración en un filtro a presión de placas verticales. Se utiliza tierra infusoria, previamente añadida a temperatura entre 60 °C y 65 °C; el jarabe se filtra a un flujo de 2,3 m³/h.

Como tercera etapa se realiza la síntesis de FOS en el reactor de hidrogenación catalítica que se emplea para la producción de sorbitol. Se añade la sacarosa a 50 Brix y se regula la temperatura a 45 °C. Se ajusta el pH a 5,5±0,1, de ser necesario. Se adiciona la enzima 1-SST a razón de 8,3*10⁻⁴ kg/L. La reacción se desarrolla en un tiempo de 16 h. El sistema se agita con aire a intervalos de 30 min de duración. Al terminar el proceso se obtiene un jarabe de FOS de color ámbar claro.

Para la cuarta etapa, el jarabe se trata con una mezcla de tierra infusoria y carbón activado preparada previamente en proporción 2:1. El proceso se realiza en un tanque donde se añaden 500 g de mezcla por cada m³ de jarabe. El objetivo de esta etapa es la eliminación de olores y colores indeseados en el producto final.

En la quinta etapa del proceso el jarabe de FOS se filtra a través de un filtro a presión de placas verticales. La filtración se lleva a cabo a un flujo de 2,3 m³/h, debiendo lograrse los parámetros de calidad establecidos: pH=(5-7), Brix ≥ 45, color =0 ICUMSA y conductividad ≤ 2 μS/cm.

En la sexta etapa el jarabe de FOS se concentra hasta 75 ± 1 Brix en un sistema integrado por un evaporador de película descendente, un separador de arrastres, un condensador, una bomba de vacío y un sistema de bombeo. Con flujo de entrada entre 2,0 m³/h y 2,4 m³/h, se elimina el agua y se prolonga la estabilidad del producto terminado en el tiempo. El producto concentrado es un sirope de FOS mezcla con más de 55 % de FOS totales (1 kestosa + nistosa), parámetro indispensable para su posterior comercialización.

Finalmente, el FOS mezcla se bombea hacia los tanques de almacenamiento para distribuir en toneles de peso neto aproximado de 260 kg, o a granel.

Simulación de la tecnología de obtención de FOS a partir de sacarosa: caso base

Para realizar la simulación de la planta de obtención de FOS, que procese 1 500 kg de sacarosa en cada ciclo se seleccionó el modo de operación discontinuo y el tiempo de operación de 90 días al año, lo que permite que se aproveche la instalación instalada. Se empleó el programa SuperPro Designer v10.0. Para la selección de los componentes se crearon algunos componentes hipotéticos que no existen en la base de datos del simulador. Los componentes creados y sus propiedades se reportan en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los componentes creados.

Componentes	Propiedades	Valor
Tierra infusoria	Masa molar (g/mol)	60,8
	Punto de ebullición (°C)	259
	Densidad (g/l)	2 300
Nistosa	Masa molar (g/mol)	666,58
	Punto de fusión (°C)	132
	Densidad (g/l)	1 840
1-kestosa	Masa molar (g/mol)	518,46
	Punto de ebullición (°C)	343,85

Para representar el proceso se utilizaron los siguientes módulos: en la etapa de disolución se utilizó un tanque de mezclado; en las etapas de filtración se utilizaron filtros de placas verticales; para las etapas de enfriamiento se utilizaron intercambiadores de calor; en la etapa de reacción se utilizó un reactor discontinuo y en la etapa de evaporación se utilizó un evaporador.

Al simular la disolución de la materia prima se utilizaron tres corrientes de entrada al módulo, que consisten en agua desmineralizada (agua), sacarosa (azúcar refino) y vapor de agua (vapor 1).

Para la etapa de filtración en la simulación se definieron las corrientes de entrada a este módulo formadas por la corriente proveniente del tanque de disolución y la corriente de tierra infusoria. Además, se establecieron los componentes a eliminar en la operación (tierra infusoria, insolubles), así como el tiempo de duración (1,10 h) y el flujo de filtrado (2,3 m³/h).

En la simulación de la etapa de reacción enzimática se establecieron las corrientes de entrada, una proveniente del filtro con la disolución y la otra con el flujo de enzima a utilizar en el reactor (1-SST). También quedaron especificados los siguientes parámetros: temperatura de reacción (45 °C), estequiometría de las reacciones y el porcentaje de completamiento (80 %), así como el tiempo de duración de la operación (16 h) .

En las tablas 2 y 3 se muestran los parámetros de las corrientes de entrada a los módulos de operación y las reacciones químicas que ocurren en el reactor.

Tabla 2- Parámetros de las corrientes de entrada a los módulos

	Corrientes	Masa o flujo (kg/lote)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)
	Azúcar refino	1 500	28	101,3
	Agua	1 500	28	101,3
	Vapor 1	182,67	133,6	300,0
Reactor	Mezcla filtrada	-	65	101,3
	1-SST	8,3*10 ⁻⁴ (kg/L)	28	101,3
Tanque contenedor	FOS	-	45	101,3
	Carbón activado (CA)	0,25	28	101,3
	Tierra infusoria (TI)	0,50	28	101,3
Evaporador			40	101,3

Tabla 3- Reacciones químicas

Reacciones	Estequiometría
1	2 sacarosa → 1-kestosa + glucosa
2	2 (1-kestosa) → nistosa + sacarosa
3	1-kestosa + sacarosa → nistosa + glucosa
4	nistosa → 1-kestosa + fructosa
5	1-kestosa → sacarosa + fructosa
6	sacarosa → glucosa + fructosa

Para la validación del modelo de simulación se utilizaron los datos obtenidos en una prueba en planta y la información suministrada por la firma Quantum Hitech Biotechnology (QHB).⁽⁵⁾ Se calculó el error relativo al comparar los valores obtenidos al simular con los suministrados por los datos de la producción y de la firma QHB. Se consideró validado el modelo para un error relativo menor que 5 %.⁽⁸⁾

Se quiere utilizar la planta para la producción de FOS el tiempo que esté en parada por la falta de glucosa, materia prima del proceso de producción de sorbitol. Como este tiempo varía en dependencia de la disponibilidad de glucosa se estableció para el estudio un tiempo de producción de 90 días/año.

Simulación de la modificación tecnológica: alternativa 1

La primera modificación consistió en aumentar la escala productiva del FOS teniendo como referencia los volúmenes manejados para obtener sorbitol. El cambio permitiría además de suplir la probable demanda nacional, generar un excedente con fines de exportación. Para llevar a cabo la propuesta se

alimentan al proceso 25 000 kg tanto de sacarosa como de agua. Las restantes corrientes se modifican proporcionalmente al caso base.

Simulación de la modificación tecnológica: alternativa 2

Se evaluó una propuesta de mejora que modifica la concentración inicial de sustrato disminuyendo la masa de agua en la disolución de la sacarosa con el fin de utilizar menos agua, vapor, energía eléctrica y tiempo, con lo que aumenta el rendimiento energético de la planta.

Es conocido de ensayos realizados ⁽⁵⁾ que la inhibición por sustrato no es una interpretación acertada para la interacción enzima-sustrato, sin embargo, la modificación en la concentración inicial de sacarosa puede provocar cambios en las conversiones de las reacciones involucradas para un mismo tiempo de reacción. Para determinar el valor mínimo de la relación sacarosa/solvente a modificar se evaluó la solubilidad de la sacarosa a 50 °C, temperatura cercana a la de la etapa de reacción, siendo 2,69 kg de sacarosa/kg de agua.⁽⁹⁾ Se realizaron corridas de simulación para determinar el contenido de FOS totales alcanzado para las relaciones másicas del caso base (sacarosa/agua de 50:50) y una cercana a la mínima calculada (3,16 kg de sacarosa/kg de agua que corresponde a sacarosa/agua 76:24).

Evaluación económica

Para la evaluación económica se calculó la ganancia anual a partir de los egresos e ingresos que se pudieran generar si la planta operara 90 días al año produciendo FOS (10). Se utilizaron las ecuaciones (1-3)

$$A_{NCI} = A_{CI} - A_{IT} \quad (1)$$

$$A_{CI} = A_S - A_{TE} \quad (2)$$

$$A_{IT} = (A_{CI} * A_D * A_A) * t \quad (3)$$

donde:

A_{NCI} : ingresos de caja anuales netos; A_{CI} : ingresos de caja anuales; A_{IT} : importe anual por impuestos; A_S : ventas anuales; A_{TE} : costos totales anuales; A_D : cargos anuales por depreciación; A_A : monto anual de otros cargos; t : razón fraccional de impuestos (0,35).

Se evaluó la relación beneficio/costo por la ecuación (4).

$$\text{Beneficio/Costo} = A_{NCI} / \text{Egresos} \quad (4)$$

Resultados y discusión

El esquema del proceso tecnológico para la obtención de FOS a partir de sacarosa se presenta en la figura 1.

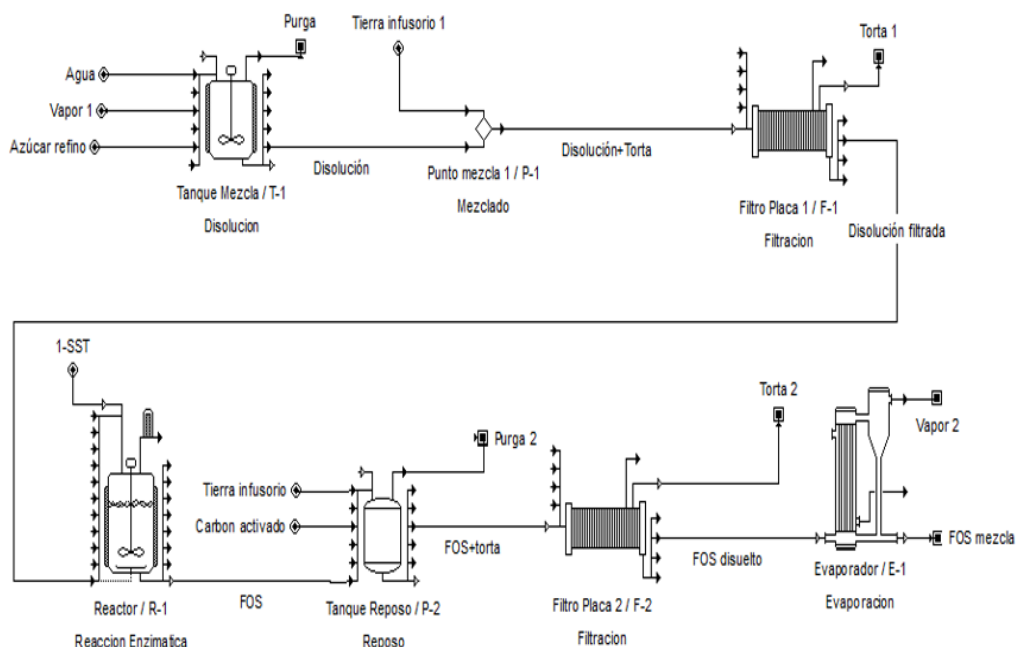


Fig.1- Esquema del proceso de obtención de FOS a partir de sacarosa

El resultado del balance de materiales para el caso base arrojados por el simulador en las principales etapas del proceso se muestra en la tabla 4, para un ciclo con una duración de 21,17 h. Se obtiene una relación de 1,22 t de FOS / t de sacarosa. Para 90 días de operación sería posible realizar 102 ciclos.

Tabla 4- Resultados de las corrientes de la simulación del caso base

Corriente de entrada	Flujo másico (kg/Lote)	Composición másica en %			
		Sacarosa	1-kestosa	Nistosa	Agua
Filtro 1	3 186	47,078	-	-	52,811
Reactor	3 182	47,133	-	-	52,866
Filtro 2	3 194	5,123	23,258	2,551	52,175
Evaporador	3 175	5,152	23,393	2,566	52,792
Almacén	1 834	8,919	40,495	4,430	18,279

Luego de evaporar el 75 % de la masa de agua de la mezcla se obtiene un producto final con un 54,8 % de FOS totales en base seca, parámetro que cumple con los estándares internacionales para la comercialización. En la tabla 5 se presenta el resultado de la validación del modelo de simulación, que permite afirmar que el modelo utilizado representa adecuadamente la producción industrial de FOS, al obtenerse errores de validación menores del 5 %. Al quedar validado el modelo, es posible su utilización para evaluar modificaciones en el proceso.

Tabla 5- Comparación de los resultados obtenidos en el caso base

Parámetro	Simulación	Prueba industrial	Error relativo (%)	FOS QHB	Error relativo (%)
% de 1-kestosa (Base seca)	49,60	49,09	1,03	51,02	2,86
% de nistosa (Base seca)	5,42	5,64	4,05	5,68	4,79
Densidad (kg/m ³)	1 337	1 340	0,22	1 330	0,52

Resultados de la simulación de la producción de FOS: alternativa 1

Los resultados que se obtuvieron en la simulación se muestran en la tabla 6.

Tabla 6- Resultados de las corrientes de la simulación para la alternativa 1

Corriente de entrada	Flujo másico (kg/Lote)	Composición másica en %			
		Sacarosa	1-kestosa	Nistosa	Agua
Filtro 1	53 092	47,088	-	-	52,802
Reactor	53 025	47,143	-	-	52,856
Filtro 2	53 235	5,124	23,262	2,552	52,648
Evaporador	52 921	5,153	23,398	2,567	52,782
Almacén	30 572	8,920	40,498	4,443	18,273

En este ciclo se producen 30,572 t de FOS con 25 t de sacarosa. El ciclo tiene un tiempo de duración de 124 h por lo que en 90 días de producción se pueden completar 17 ciclos. Las modificaciones no cambian la composición del producto final, con lo que se logran los estándares de calidad requeridos para su comercialización.

Resultados de la simulación de la producción de FOS: alternativa 2

En la tabla 7 se aprecia que existe un ligero aumento del grado de conversión y del contenido de FOS totales al aumentar la concentración de sacarosa, al menos en la proporción estudiada.

Tabla 7- Efectos de la concentración inicial de sacarosa en la conversión

Reacción	Composición de la alimentación % (50-50)		Composición de la alimentación % (76-24)	
	Conversión (%)	FOS totales (%)	Conversión (%)	FOS totales (%)
1	84		87	
2	11		15	
3	43	55,02	48	57,97
4	33		35	
5	6		8	
6	5		10	

Los errores relativos se calcularon comparando los FOS totales de ambas corridas simuladas con los del FOS de HBQ. Se obtuvo un error de 3,03 % para la proporción 50:50 y un 2,19 % para la proporción 76:24, ambos errores menores que un 5 %, por lo que se aceptaron para la realización de la simulación de la alternativa. Los resultados obtenidos para la alternativa 2 se muestran en la tabla 8.

Tabla 8- Resultados de las corrientes de la simulación para la alternativa 2

Corriente de entrada	Flujo másico (kg/Lote)	Composición másica en %			
		Sacarosa	1-kestosa	Nistosa	Agua
Filtro 1	52 476	68,602	-	-	31,286
Reactor	52 407	68,685	-	-	31,314
Filtro 2	52 614	7,465	33,892	3,718	31,191
Evaporador	52 299	7,509	34,093	3,740	31,198
Almacén	46 748	8,400	38,138	4,184	23,036

En esta alternativa se disminuye el agua de alimentación del proceso a la condición límite de solubilidad de la sacarosa a esa temperatura con lo que disminuye el tiempo de operación y provoca que aumente el número de ciclos para un año de trabajo. Por otra parte, el aumento de la concentración de la sacarosa en el reactor provoca variaciones en los porcentajes de conversión que favorecen la formación de los componentes de interés en las reacciones involucradas en el proceso.

Con la modificación se pueden producir 46,748 t de FOS con 36 t de sacarosa (1,3 t de FOS /t de sacarosa). El tiempo de duración del ciclo es de 117 h, por lo que en 90 días se pueden completar 18 ciclos de producción.

Evaluación económica

Se calcularon los ingresos obtenidos a partir del precio de venta del FOS en el mercado internacional, teniendo en cuenta que la planta opera 90 días al año y 24 horas al día. Dada la producción en cada ciclo y el número de ciclos para cada una se obtienen ingresos de 1 559 172 USD para la alternativa 1 y 2 524 392 USD para la alternativa 2. Los mayores ingresos se generan con la alternativa 2 con un incremento de producción de un 52,9 %. Para el cálculo de los egresos del proceso de producción de sirope de FOS a partir de sacarosa se tuvieron en cuenta los componentes que se muestran en la tabla 9.

Tabla 9- Egresos necesarios para cada alternativa

Componentes	Alternativa 1		Alternativa 2	
	Consumo (año)	Costo (USD)	Consumo (año)	Costo (USD)
Sacarosa (t)	425	476 314	648	726 239
Agua (m ³)	425	4 386	240	2 477
Tierra infusoria (kg)	1 972	2 603	2 088	2 756
Carbón activado (kg)	1 989	3 182	2 106	3 370
1-SST (kg)	714	807	756	854
Electricidad (kW-h)	64 211	48 800	103 96	79 011
Vapor (t)	519,72	2 183	841,46	3 534
Fuel oil (t)	15	14 092	24,40	22 816
Salario	-	37 163	-	37 163
Total	-	589 530	-	878 220

Se aprecia que la sacarosa, la electricidad y el salario son los componentes fundamentales en la estructura del egreso. Para la alternativa 1, la sacarosa representa el 80,8 % y para la alternativa 2 el 82,7 %, mientras que la electricidad representa el 8,3 % para la alternativa 1 y el 9 % para la alternativa 2.

El cálculo de las ganancias obtenidas a partir de los ingresos y egresos para cada caso de estudio se muestra en la tabla 10, así como la relación beneficio/costo.

Tabla 10- Ganancias netas de cada alternativa, USD/año

Caso de estudio	ACI (USD)	AIT (USD)	ANCI (USD)	Beneficio /costo
Caso 1	969 940	339 479	630 566	1,07
Caso 2	1 646 170	576 160	1 070 011	1,21

Ambas alternativas tienen una relación beneficio/costo mayor que 1, pero la mejor alternativa es la 2 ya que, a pesar de generar un aumento en los gastos para la producción, son mayores las ganancias generadas por concepto de venta de sirope de FOS, con lo que la ganancia neta es superior.

Conclusiones

Se desarrolló un modelo de simulación de la tecnología de producción de sirope de fructo-oligosacáridos a partir de sacarosa. La validación del modelo arrojó errores relativos menores que el 5 % al comparar los resultados de la simulación con los datos de una prueba industrial y de un producto similar fabricado en China. Para el caso base la producción obtenida fue de 187 t/año de producto terminado. Empleando el modelo de simulación se analizaron dos alternativas de mejora a partir de aumentar la producción de FOS al utilizar la capacidad real instalada en la fábrica de sorbitol (alternativa 1) y además aumentar la concentración inicial de la solución de sacarosa (alternativa 2). La alternativa de mejores resultados resultó la segunda, con la que se pueden realizar en los 90 días de trabajo 18 ciclos/año, que arrojarían 841,5 t de producto. Con la segunda alternativa se obtiene una relación beneficio/costo de 1,2.

Referencias bibliográficas

1. RÍOS, A. La ingeniería agrícola del productor cubano. 2 ed. Instituto de Mecanización Agrícola (INFOIIMA). La Habana, Cuba, 2014. ISBN 978-959-285-024-8
2. ARAYA H. Functional and healthy foods. *Revista chilena de nutrición*. 2018; **30**(1):22-30, ISSN 0717-7518.
3. PÉREZ, E.; MARTÍNEZ, D.; MENÉNDEZ, C.; ALFONSO, D., RODRÍGUEZ, I.; TRUJILLO, L.; SOBRINO, A.; RAMÍREZ, R.; PIMENTEL, E., HERNÁNDEZ, L. Fructooligosaccharides production by immobilized *Pichia pastoris* cells expressing *Schedonorus arundinaceus* sucrose:sucrose 1-fructosyltransferase. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2021, **48**(5-6):kuab036. doi: 10.1093/jimb/kuab036, ISSN 1476-5535.
4. Fructo-oligosaccharides (FOS) Market Size, Share & Trends Analysis Report By Source (Sucrose, Chicory), By Form (Liquid, Powder), By Application (Infant Formulation, Food & Beverages), By Region, And Segment Forecasts, 2023 – 2030 Disponible en: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/fructo-oligosaccharides-market>
5. CAPOTE O., PÉREZ E. R, FONTE A. ALFONSO M., CABALLERO A., ÁNGEL MARSHALL A., DELGADO E., CONSUEGRA R., MARTÍNEZ Y., GONZÁLEZ G. “Estudio del escalado de la producción de fructo-oligosacáridos (FOS) a nivel industrial en la planta de sorbitol”. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar* 2018, **52** (2) pp 47-55, ISSN 0138-6204.
6. CAPOTE O., PÉREZ E. R, SABADI R, CHANFON J MARTGINEZ D SOBRINO A Análisis del empleo de diferentes materias primas azucaradas en la producción de fructo-oligosacáridos *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar* 2023, **57** (2) , pp 55-61, ISSN 0138-6204.
7. HERNÁNDEZ L, MENÉNDEZ C, PÉREZ ER, MARTÍNEZ D, MUSACCHIO A, RAMÍREZ R, SOBRINO A, TRUJILLO LE, ALFONSO D. Catalizadores enzimáticos novedosos para la producción de fructo-oligosacáridos a partir del azúcar de caña. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba* [Internet]. 2021 [citado en día, mes, año]; **11**(2):e854. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/854>

8. BARLAS Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*. 1996; **12**(3):183-210, ISSN:0883-7066.

9. REIN P, REIN P. *Ingeniería de la cana de azúcar* Bartens, Berlin, 2012 ISBN 9783870401429.

10. FERNÁNDEZ E, GONZÁLEZ G, MAYO O. Ingeniería Económica para Ingenieros Químicos. Monografía. La Habana, Cuba: Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”; 2002.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no hay conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Héctor Mengana Domínguez: software, conservación de datos, investigación, primera redacción.

Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas: conceptualización, investigación, redacción, revisión, supervisión.

Osney Pérez Ones: conceptualización, investigación, redacción, revisión, supervisión.

Alejandro Fonte Pérez: software, conservación de datos.

Guillermo A. González Pedroso: software, conservación de datos.